干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY



# 新疆植被NPP及其对气候变化响应的海拔分异

姜 萍[1,2]， 丁文广[1]， 肖 静[2]， 潘新民[2]
(1. 兰州大学资源环境学院,甘肃 兰州 730000；2. 新疆维吾尔自治区气象服务中心,新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘 要**：利用2000—2017年MODIS NPP数据与气象观测数据，采用趋势分析及相关分析法，揭示了新疆地区植被净初级生产力(NPP)时空演变格局及其对气候变化响应的海拔分异性。结果表明：(1) 18 a间，新疆植被NPP年均值为145.96 g C·m$^{-2}$，以4.422 g C·m$^{-2}$·(10a)$^{-1}$速率呈不显著增长；受地形及区域水热条件的制约，植被NPP表现出北疆优于南疆、山区优于平原的分布规律。(2) NPP均值大体上随海拔的增加先增后减。在海拔<1400 m区域内，植被NPP以增势为主，向好趋势集中在天山北坡、准噶尔盆地南缘及南疆西北缘等地；在1400~3800 m海拔区域内，植被NPP主要呈弱的负增长，其中天山山区及其南麓、阿尔泰山局部等高海拔山区NPP退化严重。(3) 降水量是新疆植被生产力水平变化的主要驱动因素，但气温在高海拔(>3900 m)地区取代降水成为限制植被活动的主导因子。在不同海拔梯度下，植被NPP与气温主要呈负相关性，与降水量呈正相关性，且相关性在海拔<1400 m时有更突出的梯度差异。

**关 键 词**：植被；NPP；气候变化；海拔分异；新疆
**文章编号**：

陆地净初级生产力(Net primary production，NPP)指单位时间、单位面积上植被固定的有机干物质的总量，是表征陆地生态系统健康的关键指标，能够直观反映生态环境的变化和区域碳收支水平[1-2]。在全球气候变化加剧背景下，植被NPP变化研究成为国际研究计划的核心内容之一，并在全球和区域范围内受到广泛关注[3]。

随着遥感技术的飞速发展，以长时间遥感数据作为主要数据源，众多学者开展了不同时空尺度上植被生产力水平变化的相关研究。现有研究主要围绕植被生产力时空演变格局、植被生产力与气候变化间的响应关系、植被生产力的驱动因素及各因素影响力的定量分析等方面开展[2-6]。研究显示，在气候变化驱动下，全球植被生产力水平呈向好趋势，但空间差异明显[3]。植被-气候关系同时存在驱动因子复杂性和空间异质性，但降水/干旱、气温以及辐射量被证实是限制植被生长的主要气候因子，分别在干旱/半干旱区、高纬度地区、热带雨林等环境中对植被动态起决定性作用[7]。残差分析法初步实现了气候、人为因素对植被影响的定量评估，结果表明城市化进程、农业发展、生态建设工程等人类活动对植被影响显著[5]。除气候、人为因素外，地形能通过直接或间接影响水热气候条件的空间差异和人类干扰程度，从而影响植被的生长与分布[8-9]。研究亦表明，气候变暖趋势具有显著的海拔敏感性[1]，海拔梯度能在较小地理范围内引起水热组合、地表温度等变化[10]，进而引起植被动态出现垂向差异[11]。在此背景下，国内学者先后对念青唐古拉山[12]、三江源[13]、秦岭地区[8]及青藏高原[14]等地区植被变化、植被对气候变化的敏感性沿海拔梯度的差异展开了分析，证实了植被随海拔升高通常表现出先增后减的单峰分布格局，气温、降水对植被的影响存在海拔分异性，较高海拔地区植被生长主要受气温控制，而中低海拔地区受降水影响较大等结论。

**收稿日期**：2020-03-27； **修订日期**：2020-07-01
**基金项目**：中国科学院A类战略性先导科技专项资助(XDA20100102)；新疆气象局中亚区域大气科学研究基金项目(CAAS201912)
**作者简介**：姜萍(1989-)，女，工程师，硕士，主要从事气候变化与应对研究. E-mail: jp544867803@126.com
**通讯作者**：丁文广(1963-)，男，博士，教授，主要从事灾害风险管理研究. E-mail: wgding@lzu.edu.cn

新疆是中国典型的内陆干旱生态脆弱区，地貌类型多样，植被分布呈现出明显的垂直地带性[9]。20世纪80年代以来，新疆气候"暖湿化"趋势愈发明显[15-16]，加之人类活动的不断加剧，地区植被生态系统与生产力水平变化明显。近年来，围绕新疆植被生产力演变格局、驱动因素等的相关研究渐受关注[17-18]，然而，关于新疆地区植被生产力与地形因子，特别是与海拔梯度之间相关性的研究尚且缺乏。为填补新疆植被-气候关系垂向差异研究这一空白，本文借助连续18 a的NPP遥感数据和气象观测资料，对新疆地区2000—2017年植被NPP的分布格局及变化趋势进行系统分析，重点探讨其动态变化特征和气候驱动机制的海拔梯度差异，以期为干旱半干旱区域生态环境建设和生态保护提供理论依据和决策参考。

## 1 研究区概况

新疆位于中国西北边陲，地处73°40′~96°18′E，34°25′~48°10′N之间，总面积166×10⁴ km²，境内山脉与盆地相间排列，"三山夹两盆"的地域结构形成了山体、绿洲、盆地交替的独特地貌格局（图1）。新疆深居内陆，远离海洋，高山环抱，形成了典型的温带大陆性气候，具有气温温差较大，降水量少且分布不均（年平均降水145 mm左右），日照充足，气候干燥等鲜明气候特征。独特的地形及气候特点，使得地区植被水平与垂直分布差异显著，生态系统较为脆弱、敏感。

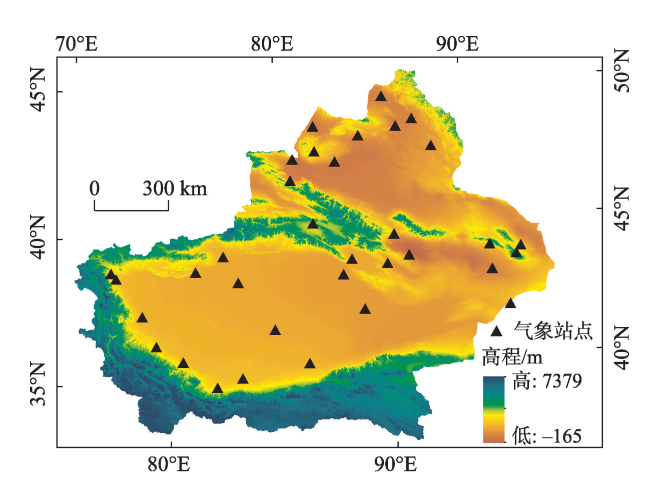



图1 研究区概况及气象站点分布

Fig. 1 Overview of the study area and distribution of the meteorological stations

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

植被生产力数据采用2000—2017年MOD17A3 NPP产品，该数据来自美国国家航空航天局网站(https://www.modis-land.gsfc.nasa.gov)，时间分辨率为月，空间分辨率1 km。目前该数据已广泛应用于区域及全球碳循环模拟、生态系统评价、环境变化检测等诸多领域[18-20]。

气象数据取自中国气象科学数据共享服务网(https://data.cma.cn)，包括2000—2017年新疆34个国家基准气候站的月平均气温、月降水量数据序列。该数据集经过严格的质量控制，准确性及完整性满足研究需求。本文采用ANUSPLIN专用气候插值软件的薄盘样条函数法实现气象数据空间插值，并以新疆地区500 m×500 m DEM数据为协变量提高插值准确性，获得空间分辨率为500 m的气象格点数据。

利用ArcGIS10.2对NPP数据、气象格点数据进行投影转换、裁切等处理，将实验数据统一处理为时间跨度2000—2017年、空间分辨率500 m、空间参考为Krasovsky_1940_Albers的年度序列用以分析。

### 2.2 研究方法

（1）趋势分析

利用一元线性回归分析逐像元模拟NPP的变化斜率，揭示18 a间新疆地区植被NPP的变化趋势及其空间差异。其计算公式如下：

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n}(i \times \text{NPP}_i) - \sum_{i=1}^{n} i \times \sum_{i=1}^{n} \text{NPP}_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \quad (1)$$

式中：Slope为趋势斜率；$n$为研究时段年数；$\text{NPP}_i$为第$i$年新疆地区植被NPP均值。当Slope > 0，表示植被NPP呈增加趋势；当Slope=0，表示植被生长状况变化不明显；当Slope < 0，表示植被NPP呈下降趋势。Slope值越大，表示植被净初级生产力变化趋势越明显。采用$F$检验对变化趋势显著性水平进行判别。

（2）相关性分析

采用Pearson相关分析方法对NPP年均序列与同期气温、降水序列进行逐像元相关分析，评估不同气候因子对植被NPP变化的相对贡献率，以此表

征植被生长对气候变化的响应。Pearson相关分析计算公式如下：

$$r=\frac{n\sum_{i=1}^{n}X_iY_i-\sum_{i=1}^{n}X_i\sum_{i=1}^{n}Y_i}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n}X_i^2-n\bar{X}^2\right)\left(\sum_{i=1}^{n}Y_i^2-n\bar{Y}^2\right)}} \quad (2)$$

式中：$n$为研究时段年数；$X$、$Y$分别对应相关分析的2个变量。相关系数$r$取值范围为[−1，1]，相关系数的绝对值越大，说明植被NPP与气候因子变化的相关性越高；反之，表明二者相关性越小。

## 3　结果与分析

### 3.1　新疆植被NPP时空分布及演变

2000—2017年新疆植被NPP分布的区域差异明显（图2a），突出表现为北疆大于南疆、山区大于平原。天山山区、阿尔泰山山区等属NPP高值区，NPP均值普遍大于200.0 g C·m$^{-2}$·a$^{-1}$，部分地区甚至大于360.0 g C·m$^{-2}$·a$^{-1}$。山区通常以林地为主，加之水分条件充足，植被生产力整体水平较高。北疆自西向东NPP逐渐降低。南疆除部分平原地带外，大部分地区NPP不到90.0 g C·m$^{-2}$·a$^{-1}$。总体上，2000—2017年新疆地区NPP呈波动增加趋势，线性增长率为4.422 g C·m$^{-2}$·(10a)$^{-1}$。

全区58.2%的植被区域NPP变化斜率大于0，显著变化区域达26.4%（$P$<0.05），表明地区植被以生产力增加、生长状态有所改善为主（图3）。天山北坡、准噶尔盆地南缘NPP增加趋势最为显著，认为主要原因是受大西洋和北冰洋水汽影响，北坡年降水量较多，能有效缓解土壤水分缺失并促进植被生长；南疆NPP转好趋势主要出现在南部山地的北坡。与NPP分布特征不同，山区是植被NPP呈减少趋势的主要区域，其中，天山山区及其南麓、阿尔泰

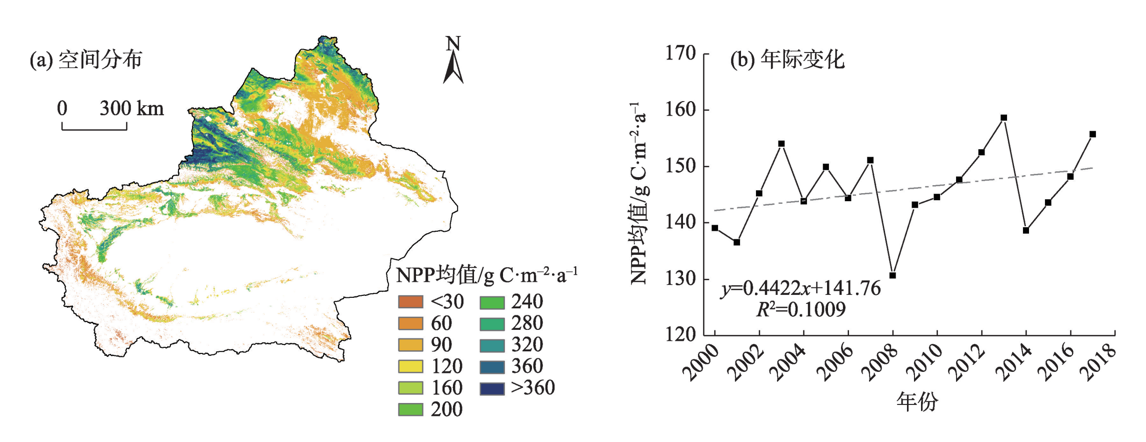
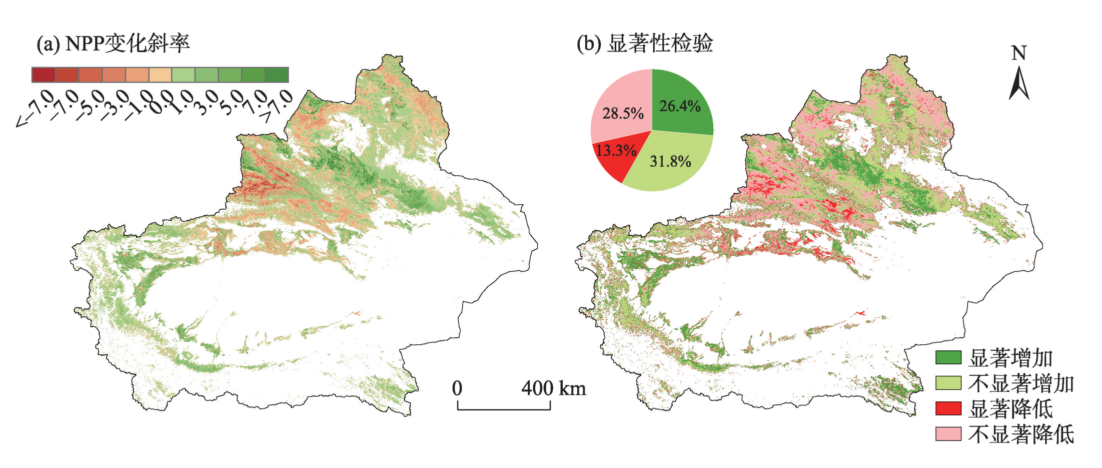



图2　2000—2017年新疆植被NPP空间分布与年际变化

Fig. 2　Distribution of NPP average value and its annual trend in Xinjiang from 2000 to 2017




注：左上角饼图表示面积占比。下同。

图3　2000—2017年新疆植被NPP变化趋势及其显著性检验

Fig. 3　Variation trend of vegetation NPP and its significance testing in Xinjiang from 2000 to 2017

山东部等局部区域减势较为突出，部分地区植被生产力退化显著（Slope<0且$P$<0.05）。

### 3.2 新疆植被NPP海拔分异

受水热条件的差异影响，新疆地区植被盖度在不同海拔高度上有明显差异（图4）。海拔300~1400 m为植被主要分布区，植被占地面积累积达26.40×10⁶ hm²；此后，随着海拔升高，植被盖度逐渐减少。植被生产力与植被盖度的垂向分布并不完全一致。植被NPP表现出以海拔900 m为界、先增后减的双峰型格局，其中，海拔1700~1800 m内植被生产力水平最高。分析认为，较低海拔（<800 m）区域水热条件较为充足，且以农耕植被为主，NPP保持相对较高且较稳定的水平；800~1000 m海拔区域内，城镇化影响剧烈，NPP大幅降低；海拔升至1800 m过程中，植被类型向荒漠草原、平原草原等过渡，又因主要分布于山前平原带，地形雨与冰雪融水保障了充足的土壤水分，植被覆盖度广，且受人为干预程度随海拔升高逐渐减小，导致生产力提增；海拔继续升高时，植被逐渐由平原草原向山地草原、山地针叶林、高山草甸、高山垫状植被等类型过渡，植被生存空间及盖度大幅减少，加之水热条件的限制，生产力逐渐下降。

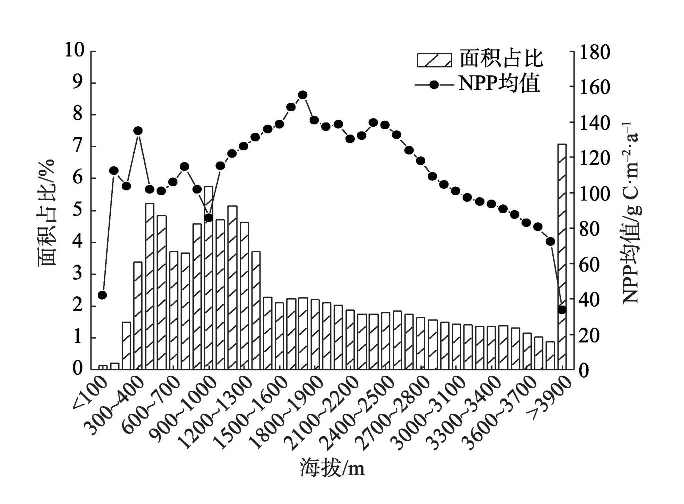


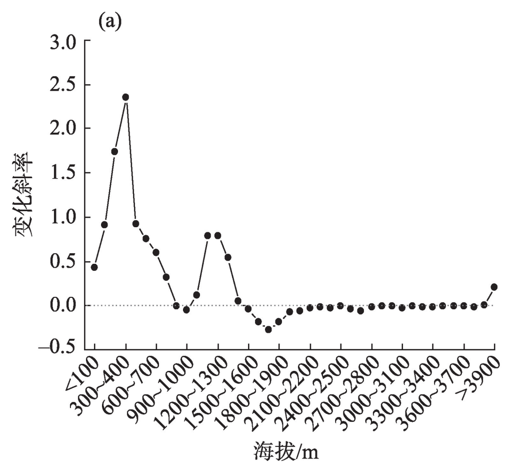

图4 各海拔范围内新疆植被NPP均值及占地面积的变化

Fig. 4 Variations of average NPP and vegetation coverage at different elevations in Xinjiang

NPP变化趋势方面（图5a），在海拔<1500 m时植被NPP基本呈增加趋势（Slope>0），其中，海拔200~400 m区域内NPP增势最为突出，其次为海拔1100~1300 m区域；在海拔1500~2100 m区域内，NPP以减势为主（Slope<0）；海拔2100~3900 m区域内，NPP变化趋势无明显海拔分异；海拔>3900 m时趋势由减转增，表明受升温影响，高海拔地区生态环境逐渐向利于植被生长的方向发展。对各垂直带上植被生产力的变化方向及程度进行分析可见（图5b），在海拔2000 m区域内植被NPP降低幅度最大，降低比例为54.8%（6.4%显著降低）；而<500 m及>4500 m海拔区域植被NPP增加突出，增加比例分别达77.4%（33.8%显著增加）、75.4%（30.8%显著增加）。

### 3.3 植被NPP对气候变化的响应及其海拔差异性

统计表明，近18 a间新疆植被区域表现出与全境一致的“暖湿化”（图6），植被区气温、降水分别以0.209 ℃·$(10a)^{-1}$（$P$>0.05）、15.873 mm·$(10a)^{-1}$（$P$>0.05）速率增长。对比NPP年均值可见，“冷湿”年份通常对应于NPP的增加，“暖干”年份NPP降低。同



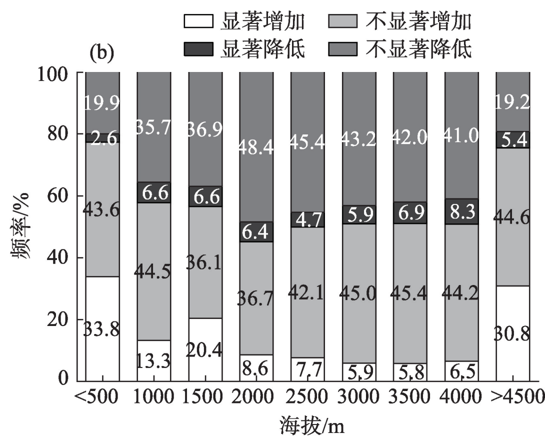




图5 新疆植被NPP变化趋势的海拔梯度分异

Fig. 5 Elevation gradient differentiation of vegetation NPP trend in Xinjiang

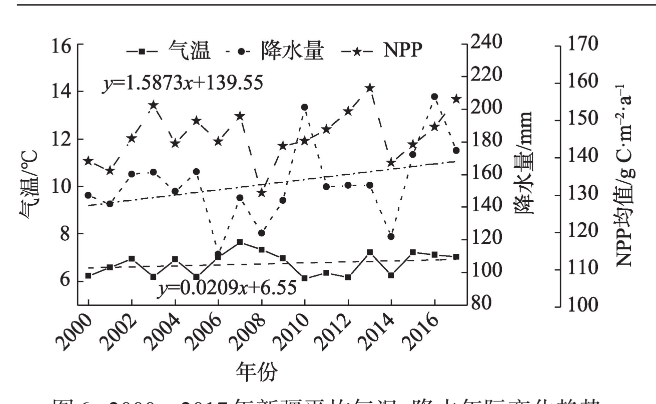



图6　2000—2017年新疆平均气温、降水年际变化趋势

Fig. 6　Inter-annual variations of average temperature and precipitation in Xinjiang from 2000 to 2017

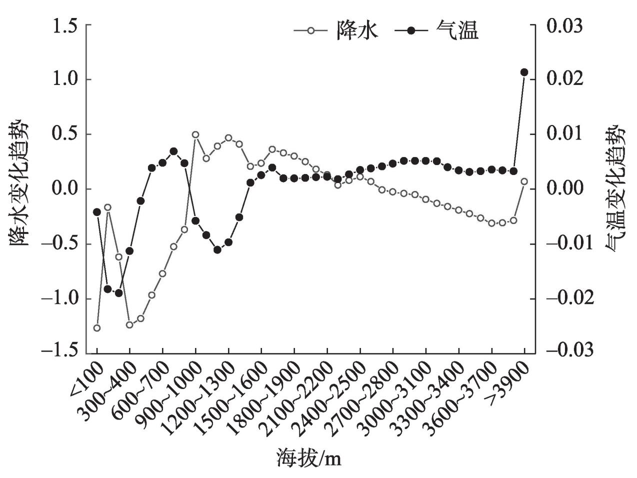



图7　新疆植被区气温、降水变化趋势的海拔差异

Fig. 7　Variations trend of temperature and precipitation on each elevation level in vegetation area of Xinjiang



时，2006—2008年间降水量的大幅减少直接限制了2008年的植被生产力水平，2010—2012年的降温与2010年的大幅增湿共同影响了2010—2013年间植被NPP的持续增长，2015—2017年间的充沛降水与降温促进了对应年份NPP的再度增加，表明植被对气候变化的响应存在一定程度的时滞效应。

各海拔高度上气温变率较小($|Slope|_{max}$=0.021)，降温趋势主要集中在<500 m及900~1400 m海拔区域内；500~900 m、>1400 m海拔区域内则以升温为主；海拔>3900 m时升温幅度最大。降水在900~2600 m垂直带内呈增加趋势，但增势与海拔成反比；其他海拔区域内降水有不同程度的减少(图7)。总体上，随海拔升高，水热条件依次出现“冷干化”(海拔<500 m)、“暖干化”(500 m<海拔<900 m)、“冷湿化”(900 m<海拔<1400 m)、“暖湿化”(1400 m<海拔<2700 m)、“暖干化”(海拔>2700 m)的梯度变化。

相关分析表明，降水量是新疆植被生产力水平变化的主要驱动因素，主导全疆64.7%的植被生产力变化，气温对植被NPP的限制则主要集中在天山山区(图8c)。图8a表明，全疆40.3%的植被NPP与气温呈正相关，其中仅2.2%达显著正相关，且多分布于降水相对充足、气温相对较低、热量主导植被生长的高海拔山区；在北疆北部及南疆的大部区域，由于降水稀少，水分可利用率较低，温度的升高将增加土壤蒸发和干旱，不利于植被生长，故NPP与气温呈负相关。降水方面(图8b)，66.9%的植被NPP与降水量呈正比(6.6%呈显著正相关)，表明对于新疆高温少雨、水分条件不足的广袤干旱区，降水量的增加对植被生产力有不同程度的促进。

在不同海拔梯度下，植被NPP与气温主要呈负相关性，与降水量呈正相关性(图9)。其中，当海拔<1400 m时，随海拔升高，NPP与气温间相关性出现正负交替现象，且波动幅度较大；在此海拔区域内，NPP与降水量呈波动剧烈的正相关性。可能原因

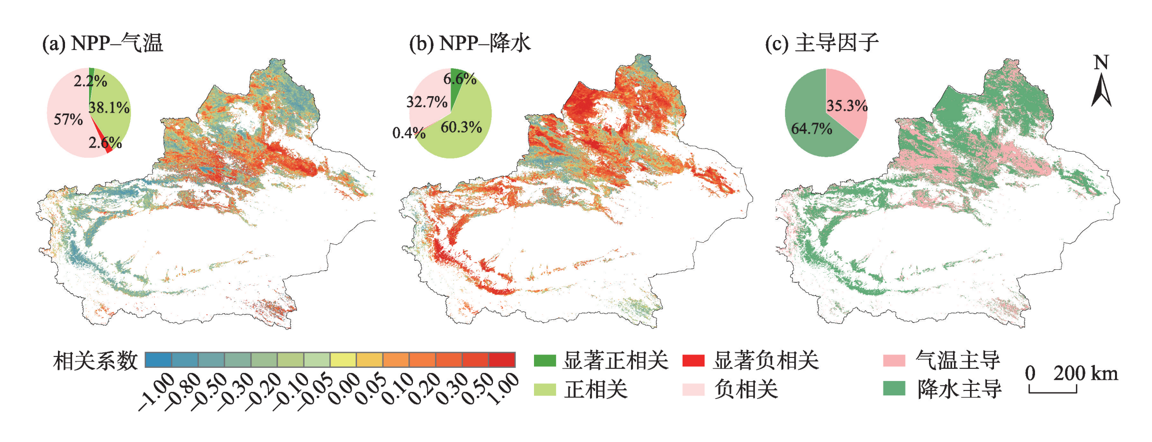



图8　新疆植被NPP与同期气温、降水相关性及主导驱动因子的空间分布

Fig. 8　Correlation between vegetation NPP and temperature and precipitation and spatial distributions of dominant driving factors in Xinjiang

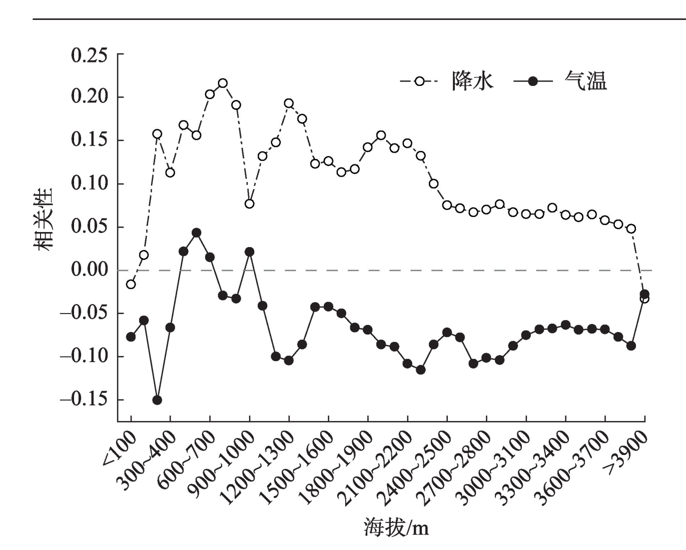



图9 新疆植被NPP与同期气温、降水相关性的海拔梯度分异

Fig. 9 Elevation gradient differentiation of vegetation NPP in relation to temperature and precipitation

为：在中低海拔区域，植被生长对水热条件变化的敏感性较高，同时受到人类活动干扰程度较大，导致植被对水分、热量响应的梯度差异明显。例如，农业区灌溉、施肥等生产措施降低了农业植被生产力对降水的相关性，导致800~1200 m海拔区域NPP与降水之间相关性的大幅降低。当海拔>1300 m时，NPP与降水间的正相关性随海拔增加逐渐减弱，与气温间的负相关性先增后减。在海拔>3900 m区域内，NPP与降水间的相关性由正转负，且小于NPP与气温的相关系数，表明当温度低于植被生长的适宜温度时，温度对光合作用的限制将取代降水对土壤水分缺失的补充，成为植被生长的主控因素。

## 4 讨 论

地形地貌及其引起的水热组合条件差异被认为是新疆地区植被生长及生产力变化的主导因素[21–22]。天山西部、阿尔泰山北部等区域的特殊地貌使得北大西洋和北冰洋的湿润气流在此汇集，形成丰沛的冷峰雨和地形雨，分布着生产力极高的天山云杉林群落[23]，成为植被NPP的高值区。天山北坡阻断由准噶尔盆地西部缺口进入的大西洋水汽形成地形雨，能为植被生长提供充足水源；而南坡背风少雨，蒸发量大，广布荒漠地带，植被稀疏[24]，进而造成植被NPP“北高南低”、“北增南减”的空间分布及变化趋势差异。低植被生产力区域主要分布于南、北疆盆地边缘等生态敏感脆弱区，这些地区高温少雨，光照充足，土地沙化严重，水源涵养功能较低，植被生境相对恶劣。然而，近年来降水量的增加，加之退耕还林、退耕还草等一系列生态环境保护政策的实施[25]，促进了干旱脆弱区生态环境的改善和植被生产力的提升。

NPP与降水量呈正比、与气温呈反比的响应关系也与已有研究结论相一致[26–27]。新疆深居内陆远离海洋的地理位置决定了地区水汽来源不足，降水稀少，土壤水分亏缺会削弱温度与植被生长的关系[28–30]，使干旱成为生态系统初级生产力的主要限制。降水量的增加能有效弥补干旱、半干旱地区土壤水分缺失，减少地表蒸散发，进而增强植被光合效率，增加其有机干物质的积累[22]，使其成为地区植被生产力的主要限制因素。但是，对于海拔较高、降水较充沛的局部山区，光合作用将转而受到温度的限制，加强植被NPP与气温之间的相关性，使“暖干”的高海拔地区气候更利于山地植被的生长[31]。然而，低温环境引起的土壤水分有效度下降可能会限制或抵消气温升高对植被生长的积极影响[14]，因此高海拔增温速率与植被生产力变率间的关系有待进一步研究[32]。与此同时，研究能够证实植被对水热条件改变的响应具有时滞效应[4]，但尚未对此展开讨论。

植被的垂直地带性分布是海拔梯度差异的另一直观体现。随着海拔高度的增加，新疆植被类型从荒漠草原向草原、林地、山地草甸草原、高山草甸或垫状植被等高海拔植被转变[33]。不同植被的需水要求、覆盖面积、地域分布特征、有机物积累效率、对气候变化的响应水平等存在差异[34]，加之不同海拔高度上人类活动强度的不同，坡度、坡向引起的地形多样化，均会进一步加剧植被NPP的海拔分异，使得开展更充分、全面的研究成为必要。

## 5 结 论

利用2000—2017年新疆地区MODIS NPP遥感数据和气象观测资料，分析了地区植被生产力的水平、垂直空间分布特征及变化规律，并首次探讨了新疆植被动态变化特征及其与水热气候因子之间相关性的垂向差异。主要结论如下：

（1）2000—2017年新疆地区植被NPP呈北疆优于南疆，山区优于平原的分布格局。NPP高值区主

要集中在天山山区、阿尔泰山山区等区域，NPP均值普遍大于200.0 g C·m$^{-2}$·a$^{-1}$；南疆除部分平原地带外，大部分地区NPP小于90.0 g C·m$^{-2}$·a$^{-1}$。地区植被生产力有所改善，58.2%的植被区域NPP呈现增势，其中，天山北坡、准噶尔盆地南缘NPP增加趋势最为显著。

（2）水热条件对新疆地区植被NPP变化的影响程度存在差异。降水量是地区植被生产力的主要限制因素，与NPP呈正相关（60.3%）或显著正相关（6.6%）关系。与此同时，气温、降水量变化对新疆地区植被NPP的相对贡献度与海拔高度密切相关，即地区植被-气候关系存在垂向差异。降水对植被NPP的正向促进作用在除极低（<200 m）、极高（>3900 m）海拔区域外普遍存在；气温与植被呈负相关为主，但部分中低海拔区域NPP同时受降水与气温的控制。近18 a来在植被NPP增加趋势在400~900 m海拔区域内的大幅下降，在900~1300 m区域有所回升，并在1300~2200 m海拔区域内存在由增转减的趋势变化（图5a），响应了对应海拔内水热组合条件的变化（图7）和NPP与气温、降水间相关性的海拔分异（图9）。

## 参考文献（References）


[1] Chi D, Wang H, Li X, et al. Assessing the effects of grazing on variations of vegetation NPP in the Xilingol Grassland, China, using a grazing pressure index[J]. Ecological Indicators, 2018, 88: 372-383.

[2] Zhao M, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009[J]. Science, 2010, 329(5994): 940-943.

[3] Peng D, Zhang B, Wu C, et al. Country-level net primary production distribution and response to drought and land cover change[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 65-77.

[4] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 等. 2001—2010年黄河流域生态系统植被净第一性生产力变化及气候因素驱动分析[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2811-2818. [Chen Qiang, Chen Yunhao, Wang Mengjie, et al. Change of vegetation net primary productivity in Yellow River watersheds from 2001 to 2010 and its climatic driving factors analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(10): 2811-2818. ]

[5] Luo Z, Wu W, Yu X, et al. Variation of net primary production and its correlation with climate change and anthropogenic activities over the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing, 2018, 10(9): 1352.

[6] Liang W, Yang Y, Fan D, et al. Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 204: 22-36.

[7] Seddon A W R, Macias-Fauria M, Long P R, et al. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability[J]. Nature, 2016, 531(7593): 229-232.

[8] 赵婷, 白红英, 邓晨晖, 等. 2000—2016年秦岭山地植被覆盖变化地形分异效应[J]. 生态学报, 2019, 39(12): 4499-4509. [Zhao Ting, Bai Hongying, Deng Chenhui, et al. Topographic differentiation effect on vegetation cover in the Qinling Mountains from 2000 to 2016[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): 4499-4509. ]

[9] 丁明军, 李兰晖, 张镱锂, 等. 1971—2012年青藏高原及周边地区气温变化特征及其海拔敏感性分析[J]. 资源科学, 2014, 36(7): 1509-1518. [Ding Mingjun, Li Lanhui, Zhang Yili, et al. Temperature change and its elevation dependency on the Tibetan Plateau and its vicinity from 1971 to 2012[J]. Resources Science, 2014, 36(7): 1509-1518. ]

[10] 邱丽莎, 何毅, 张立峰, 等. 祁连山MODIS LST时空变化特征及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 726-737. [Qiu Lisha, He Yi, Zhang Lifeng, et al. Spatiotemporal variation characteristics and influence factors of MODIS LST in Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 726-737. ]

[11] 朱晓勤, 刘康, 秦耀民. 基于GIS的秦岭山地植被类型与环境梯度的关系分析[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 192-196. [Zhu Xiaoqin, Liu Kang, Qin Yaomin. GIS-based study of vegetation-environment gradient relationship in Qinling Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(5): 192-196. ]

[12] 李翔, 王忠, 赵景学, 等. 念青唐古拉山南坡高寒草甸生产力对温度和降水变化的敏感性及其海拔分异[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5591-5601. [Li Xiang, Wang Zhong, Zhao Jingxue, et al. Altitudinal variations in the sensitivity of alpine meadow productivity to temperature and precipitation changes along the southern slope of Nyainqentanglha Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5591-5601. ]

[13] 王向涛, 陈懂懂. 三江源草地GNDVI年际波动及其沿海拔梯度敏感性分析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(8): 1411-1416. [Wang Xiangtao, Chen Dongdong. Interannual variability of GNDVI and its relationship with altitudinal in the Three-River Headwater Region[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(8): 1411-1416. ]

[14] Liu L B, Wang Y, Wang Z, et al. Elevation-dependent decline in vegetation greening rate driven by increasing dryness based on three satellite NDVI datasets on the Tibetan Plateau[J]. Ecological Indicators, 2019, 107: 105569, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105569.

[15] 高瑜莲, 柳锦宝, 柳维扬, 等. 近14 a新疆南疆绿洲地区地表蒸散与干旱的时空变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 830-837. [Gao Yulian, Liu Jinbao, Liu Weiyang, et al. Spatio-temporal variation characteristics of surface evapotranspiration and drought at the oasis area of the southern Xinjiang in recent 14 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 830-837. ]

[16] Wang H, Chen Y, Xun S, et al. Changes in daily climate extremes

in the arid area of northwestern China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 112(1-2): 15-28.

[17] 杨静, 黄秉光, 黄玫, 等. 近55 a新疆净生态系统生产力对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 1054-1060. [Yang Jing, Huang Bingguang, Huang Mei, et al. Responses of net ecosystem productivity to climate change in Xinjiang in recent 55 years[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5): 1054-1060. ]

[18] Yang H, Mu S, Li J. Effects of ecological restoration projects on land use and land cover change and its influences on territorial NPP in Xinjiang, China[J]. Catena, 2014, 115: 85-95.

[19] Zhang R, Liang T, Guo J, et al. Grassland dynamics in response to climate change and human activities in Xinjiang from 2000 to 2014[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-11.

[20] Leeuw J D, Rizayeva A, Namazov E, et al. Application of the MODIS MOD 17 net primary production product in grassland carrying capacity assessment[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 78: 66-76.

[21] 焦伟, 陈亚宁, 李稚. 西北干旱区植被净初级生产力的遥感估算及时空差异原因[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 181-189. [Jiao Wei, Chen Yaning, Li Zhi. Remote sensing estimation and the reasons for temporal-spatial differences of vegetation net primary productivity in arid region of northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(1): 181-189. ]

[22] 同琳静, 刘洋洋, 王倩, 等. 西北植被净初级生产力时空变化及其驱动因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 367-374. [Tong Linjing, Liu Yangyang, Wang Qian, et al. Spatial and temporal dynamics of net primary productivity and its driving factors in northwest China[J]. 2019, 26(4): 367-374. ]

[23] 陈冬花, 李虎, 马江林. 基于CBERS-2数据的新疆天山西部森林资源监测研究[J]. 国土资源遥感, 2007, 72(2): 86-89. [Chen Donghua, Li Hu, Ma Jianglin. The monitoring of forest resources in west Tianshan Mountain based on CBERS-2 data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2007, 72(2): 86-89. ]

[24] 吴晓全, 王让会, 李成, 等. 天山植被NPP时空特征及其对气候要素的响应[J]. 生态环境学报, 2016, 25(11): 1848-1855. [Wu Xiaoquan, Wang Ranghui, Li Cheng, et al. Spatial-temporal characteristics of NPP and its response to climatic factors in Tianshan Mountains region[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(11): 1848-1855. ]

[25] 彭珂珊, 王继军. 中国退耕还林(草)的发展历史阶段与对策探讨[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1): 106-109. [Peng Keshan, Wang Jijun. Discussion on historical stage of China's converting slope farmland into forest and glassland and countermeasures[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(1): 106-109. ]

[26] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号, 影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2012, 24(3): 219-226. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climate shift from warm-dry to warm-humid in northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 24(3): 219-226. ]

[27] 姚俊强, 杨青, 陈亚宁, 等. 西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1283-1291. [Yao Junqiang, Yang Qing, Chen Yaning, et al. Climate change in arid areas of northwest China in past 50 years and its effects on the local ecological environment[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1283-1291. ]

[28] 赵景啟, 满苏尔·沙比提, 麦丽开·艾麦提, 等. 1967—2018年托木尔峰国家级自然保护区降水时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1487-1493. [Zhao Jingqi, Mansur Shabiti, Mailikai Aimaiti, et al. Spatiotemporal variation of precipitation in Tomur Peak Nature Reserve from 1967 to 2018[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1487-1493. ]

[29] Ran G, Wang X, Ouyang Z, et al. Spatial and temporal relationships between precipitation and ANPP of four types of grasslands in northern China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(5): 1024-1030.

[30] Piao S, Nan H, Huntingford C, et al. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity[J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 1-7.

[31] Trujillo E, Molotch N P, Goulden M L, et al. Elevation-dependent influence of snow accumulation on forest greening[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(10): 705-709.

[32] Liu L, Zhang Y, Wu S, et al. Water memory effects and their impacts on global vegetation productivity and resilience[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-9.

[33] 杨红飞, 刚成诚, 穆少杰, 等. 近10年新疆草地生态系统净初级生产力及其时空格局变化研究[J]. 草业学报, 2014, 23(3): 39-50. [Yang Hongfei, Gang Chengcheng, Mu Shaojie, et al. Analysis of the spatio-temporal variation in net primary productivity of grassland during the past 10 years in Xinjiang[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(3): 39-50. ]

[34] Chen C, He B, Guo L L, et al. Identifying critical climate periods for vegetation growth in the northern Hemisphere[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018, 123: 2541-2552.

# Altitudinal difference of vegetation NPP and its response to climate change in Xinjiang

JIANG Ping[1,2], DING Wenguang[1], XIAO Jing[2], PAN Xinmin[2]

(1. School of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Xinjiang Meteorological Service Center, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

**Abstract:** Situating in an arid area with a fragile eco-environment, Xinjiang is among the regions mostly sensitive to climate change in China. The vertical zonality of vegetation and the stereoscopic change in climate in Xinjiang are obvious because of the large differences in topography. Although studying the vegetation dynamics and the changes in their climatic drivers on different elevation gradients in Xinjiang can positively help us understand the spatial differentiation of arid and semiarid ecosystems in China, previous studies still paid less attention to this. Therefore, on the basis of the MODIS NPP (net primary production) product and meteorological data from 2000 to 2017, the spatiotemporal and vertical distribution differences in vegetation NPP in Xinjiang were revealed using trend and correlation analyses. More importantly, the altitudinal gradient differences in the correlation between vegetation productivity and climate change were explored for the first time in this paper. The results showed the following: (1) in 2000—2017, there was an insignificant growth in vegetation NPP in the study area, with an average annual NPP of 145.96 g $C \cdot m^{-2}$, and the growth rate was 4.422 g $C \cdot m^{-2} \cdot (10a)^{-1}$. Constrained by regional differences in topography and hydrothermal conditions, vegetation productivity was greater in the north than in the south and was larger in the mountain area than in the plain area. Vegetation cover varied significantly across altitudes: the main distribution area of vegetation was in the range of 300−1200 m above sea level, and the accumulated area of vegetation was $26.40 \times 10^6$ $hm^2$. Vegetation productivity and vegetation cover were inconsistent with their vertical distribution characteristics; vegetation productivity was highest at altitudes between 1600 m and 1700 m. (2) Vegetation NPP was dominated by increasing trend in the areas of elevation <1400 m, and the increasing trend was mainly concentrated in the northern slope of the Tianshan Mountains, the southern margin of Junggar Basin, and the northwestern margin of southern Xinjiang. Vegetation NPP had a slightly decreasing trend at an altitude of 1400 to 3800 m, and the decline in productivity was more prominent at some high-altitude areas such as the Tianshan and Altai Mountains. (3) Rainfall was the major factor that affected the primary production of vegetation in Xinjiang. NPP was positively correlated with precipitation in 66.9% of the vegetated areas (6.6% was significantly correlated), which demonstrated that increased precipitation is effective in promoting vegetation productivity. At different elevation gradients, vegetation NPP was mainly negatively correlated with temperature and positively correlated with precipitation, and both correlations had more prominent gradient differences at altitudes <1400 m. This suggested that vegetation growth was more sensitive to changes in hydrothermal conditions at middle and low altitudes below 1400 m. However, in high-altitude (>3900 m) areas, temperature replaced precipitation as the dominant factor restricting vegetation activities. Under the general trend of global warming, the study of vertical patterns of vegetation systems and their climate-driven mechanisms in ecologically fragile areas like Xinjiang is of great significance for improving environmental management and ecological construction capacity.

**Key words:** vegetation; net primary production (NPP); climate change; altitudinal differentiation; Xinjiang